



## بهینه‌یابی شرایط هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه

مرتضی کاشانی نژاد<sup>۱</sup> و سید محمد علی رضوی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷)

### چکیده

در این تحقیق، اثر توان (۱۲۰ تا ۳۶۰ W)، زمان (۱ تا ۶ min) و دما (۲۵ تا ۶۵ °C) بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، خصوصیات رئولوژیکی (سختی، قوام و چسبندگی) و رنگ (شاخص سفیدی) خامه شیر شتر مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس این خصوصیات با استفاده از مدل‌های به دست آمده از طرح باکس-بنکن توسط الگوریتم‌های ازدحام ذرات چند هدفه و الگوریتم تپه نوردی (قابلیت بهینه‌یابی عددی در نرم‌افزار Design Expert) بهینه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش توان، زمان و دمای فراصوت، متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌ها کاهش یافت. نتایج حاصل از آزمون اکستروژن پسر و نیز نشان داد که فقط اثر متقابل توان-زمان در سطح ۹۵٪ بر سختی و چسبندگی نمونه‌ها معنی‌دار بودند به طوری که با افزایش زمان در توان‌های پایین سختی و چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یافت ولی در توان‌های بالا با افزایش زمان، سختی و چسبندگی نمونه‌ها کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان، قوام نمونه‌ها نیز به طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش توان و زمان شاخص سفیدی نمونه‌ها افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین ۵ نقطه بهینه به دست آمده نیز نشان داد که الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات میانگین توان و دمای معنی‌دار بالاتر و زمان معنی‌دار پایین‌تری را به دست آورد که این نقاط به دست آمده منجر به کاهش معنی‌دار متوسط اندازه ذرات گویچه چربی و افزایش سختی شد. بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ازدحام ذرات از عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم تپه نوردی در بهینه‌یابی مدل‌های به دست آمده از طرح باکس بنکن در بهینه‌یابی شرایط هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر داشت.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه، الگوریتم تپه نوردی، اندازه ذرات، بافت، خامه شیر شتر، فراصوت

## ۱. مقدمه

سبب افزایش راندمان و کاهش هزینه تولید محصول می‌شود [۵]. فراصوت در چند سال اخیر به عنوان یک روش مؤثر در تولید امولسیون، هموژنیزاسیون، استخراج، کریستالیزاسیون، پاستوریزاسیون در دمای پایین، ضد کف، غیرفعال‌سازی و فعال‌سازی آنزیم‌ها و میکروب‌ها، کاهش اندازه ذرات و تغییر ویسکوزیته، انتقال گرما و فیلتراسیون استفاده شده است [۶]. در ضمن، کارایی امواج فراصوت در هموژنیزاسیون شیر به اثبات رسیده و نتیجه بهتری در مقایسه با هموژنایزهای مرسوم داشته است [۷]. اصولاً امواج فراصوت از طریق پدیده حفره‌زایی<sup>۱</sup> با ایجاد حباب در سیال به شکل مکانیکی و آزاد شدن انرژی از طریق ترکیدن حباب‌ها سبب کوچک‌تر شدن اندازه ذرات می‌شوند. در سامانه‌های ناهمگنی مثل شیر، بیشتر تأثیرات مکانیکی امواج فراصوت به حفره‌زایی پایدار و ناپایدار نسبت داده می‌شود. در ضمن، از هم پاشیدن حباب‌های حاصل از حفره‌زایی گرمای محلی شدید و فشار بالایی تولید می‌کنند که این تنش‌ها و از هم پاشیدن مکرر حباب‌ها به دیواره سلولی آسیب می‌رسانند. این آسیب‌های شدید، تنش‌های مکانیکی و زودگذری را بر سطح ذرات ایجاد می‌کنند که به قطعه قطعه شدن ذرات می‌انجامد [۸]. هم چنین، عنوان شده که با اعمال نیروی فراصوت در مخلوطی از ذرات مایع، حباب‌ها در نزدیکی سطح جامد می‌ترکند و یک جریان با سرعت بالای مایع به سمت ذرات رانده می‌شود و این جریان سریع می‌تواند سطوح را بزدايد و به مواد سلولی آسیب برساند و در نتیجه سبب شکستن پیوندهای شیمیایی شود. به عبارت دیگر اثر فراصوت در هموژنیزاسیون گوچه‌های چرب از اساساً از نوع مکانیکی است [۹]. بنابراین با توجه به توضیحات بالا به نظر می‌رسد استفاده از امواج فراصوت یک راهکار مناسب برای افزایش پایداری خامه شیر شتر و کاهش اندازه ذرات آن باشد. استفاده از امواج فراصوت در صنایع لبنی در مقالات زیادی بحث شده است، ولی تاکنون مطالعه‌ای روی تأثیر امواج فراصوت بر خامه شیر شتر انجام نشده است و عمده تحقیقات روی ساختار و ترکیبات شیر گاو بوده است. ارتوگای و سنگال نیز با مطالعه تأثیر هموژنیزاسیون با امواج فراصوت (۲۰ kHz) نشان دادند که

چربی شیر شتر از نظر تغذیه‌ای به عنوان منبع انرژی، ویتامین‌های محلول در چربی و اسیدهای چرب ضروری ایفای نقش می‌کند. بررسی الگوی کلی اسیدهای چرب شیر شتر در مقایسه با سایر گونه‌ها مانند گاو، بز و گوسفند نشان می‌دهد که اسیدهای چرب کوتاه زنجیر ( $C_4-C_{12}$ ) به میزان بسیار کمتری در شیر شتر یافت می‌شوند. اما غلظت اسیدهای چرب  $C_{14:0}$ ،  $C_{16:0}$  و  $C_{18:0}$  نسبتاً زیاد و میزان  $C_{16:1}$  نسبت به سایر گونه‌ها بیشتر است. نسبت اسیدهای چرب غیر اشباع در شیر شتر بیشتر از شیر سایر گونه‌ها است [۱]. از نظر متابولیسم بدن وجود مقدار بیشتر اسیدهای چرب غیر اشباع در شیر شتر (۴۳/۱٪) در مقایسه با شیر گاو (۳۸/۸٪) مناسب‌تر است. علاوه بر این، شیرشتر حاوی مقادیر قابل توجهی از اسیدهای چرب ضروری  $C_{18:2n-6}$  می‌باشد [۲]. لذا علاوه بر شیر شتر، تولید فرآورده‌های چرب از جمله خامه شتر نیز به شرط حفظ خصوصیات مورد پسند مصرف کننده، بازار خوبی را برای تولید کنندگان فراهم خواهد کرد.

چربی شیر تمایل زیادی به جدا شدن از شیر دارد که این پدیده در حین جا به جایی، فرآوری و توزیع تشدید شده و ایجاد اشکال می‌کند. لذا استفاده از فرایند هموژنیزاسیون به منظور تثبیت امولسیون امری ضروری خواهد بود. بدیهی است که این فرایند تنها برای تثبیت امولسیون به کار برده نمی‌شود بلکه در برخی فرآورده‌ها به منظور افزایش ویسکوزیته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. هموژنیزاسیون از طریق تبدیل گلبول‌های چربی به ذرات کوچک‌تر مانع از به هم پیوستن آن‌ها و روبه بستن شیر می‌شود. بنابراین فرآیند هموژنیزاسیون تغییرات قابل توجهی در پراکندگی چربی، کوچک‌تر شدن، افزایش تعداد و سطح کل گلبول‌های چربی و تغییر در ساختمان غشا ایجاد می‌کند [۴]. از طرفی در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت تکنولوژی، استفاده از روش‌های نوین در بهبود کیفیت و کاهش زمان فرآیندهای مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های نوین استفاده از فرآیند فراصوت می‌باشد. فرایند فراصوت مزایای اساسی نسبت به سایر روش‌ها دارد. برای مثال این روش نیاز به آماده سازی نمونه نداشته، دقیق و نسبتاً ارزان است و

1. Cavitation

متفاوت چربی شیر شتر از جمله نوع اسیدهای چرب و قطر گلبول‌های چربی آن در مقایسه با چربی شیر گاو و نبود هرگونه سندی در ارتباط با تأثیر امواج فراصوت روی خامه شیر شتر، در بررسی حاضر سعی شد تا تأثیر ترکیبی توان، دما و زمان‌های مختلف اعمال امواج فراصوت بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، خصوصیات رئولوژیکی (سختی، قوام و چسبندگی) و رنگ (شاخص سفیدی) خامه شیر شتر مورد مطالعه قرار گیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. روش تهیه نمونه‌ها

شیر شتر تهیه شده از بازار محلی مشهد خریداری شد و چربی آن در مجتمع آموزشی- تحقیقاتی صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد پس از پیش گرم کردن در  $37^{\circ}\text{C}$  توسط سپراتور جدا شد. سپس نمونه‌هایی با ۲۵٪ چربی از مخلوط شیر پس چرخ و چربی تولیدی با استفاده از روش مربع پیرسون تهیه شدند. نمونه‌ها پس از پاستوریزاسیون در دمای  $80^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ min تا دمای مورد نظر ( $25^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $65^{\circ}\text{C}$ ) سرد شد و بلافاصله تیمار فراصوت روی آنها اعمال گردید.

### ۲.۲. تیمار فراصوت

به منظور بررسی تأثیر تیمار فراصوت از دستگاه سونیکاتور مدل FAPAN US-400UT ساخت کشور ایران (توان اسمی  $400\text{ W}$  و بسامد  $24\text{ kHz}$ ) با سونوترود با قطر نوک  $7\text{ mm}$  استفاده شد. برای اعمال فراصوت مقدار  $100\text{ ml}$  از خامه شیر شتر (نمونه با دماهای  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $65^{\circ}\text{C}$ ) به بشر شیشه‌ای  $150\text{ ml}$  منتقل و پروب در عمق  $2\text{ cm}$  از سطح نمونه‌ها قرار داده شد. سپس، نمونه‌ها مطابق جدول (۱) در معرض شدت‌های مختلف ۳۰ (توان اسمی  $120$ )، ۶۰ (توان اسمی  $240$ ) و ۹۰ (توان اسمی  $360$ ) درصد و زمان‌های ۱،  $3/5$  و  $6\text{ min}$  قرار گرفتند. همزمان با اعمال امواج فراصوت دمای نمونه‌ها با حس گر حرارتی کنترل و در ۳ سطح  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $65^{\circ}\text{C}$  تنظیم شد. پس از اتمام تیمار فراصوت نمونه‌ها

اندازه ذرات چربی بعد از هموژنایزر فراصوت کوچک‌تر از ذرات چربی بعد از هموژنایزرهای مرسوم بود و نتیجه گرفتند که فراصوت نتیجه بهتری در هموژنیزاسیون شیر در مقایسه با هموژنایزرهای مرسوم دارد و با افزایش زمان، تأثیر آن افزایش می‌یابد [۹]. برمودز اگیر و همکاران نیز ساختار گویچه‌های چربی در شیر را پس از تیمار حرارت - فراصوت بررسی کردند تا رخدادهای طی این فرایند را با استفاده از میکروسکپ الکترونی در سطح میکروسکوپی مشاهده کنند [۱۰].

از طرفی اغلب مسائل بهینه‌یابی در مهندسی علاوه بر غیرخطی بودن دارای محدودیت‌های زیادی هستند. بنابراین برای یافتن حل‌های بهینه برای اینگونه مسائل غیر خطی به الگوریتم‌های بهینه‌یابی مؤثر و کارا نیاز می‌باشد. بسیاری از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مدرن بر مبنای هوش جمعی و الهام گرفتن از طبیعت گسترش یافته‌اند و امروزه این الگوریتم‌های فرا ابتکاری پیشرفته با توجه به قدرت و کارایی‌شان در کاربردهای مختلف توسعه یافته‌اند. الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات<sup>۱</sup> نیز یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌یابی هوشمند است که در حوزه هوش ازدحامی<sup>۲</sup> جای می‌گیرد. این الگوریتم، توسط جیمز کندی و راسل سی ابرهات در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید، و با الهام از رفتار اجتماعی حیواناتی چون ماهی‌ها و پرندگان که در گروه‌هایی کوچک و بزرگ کنار هم زندگی می‌کنند، طراحی شده است. در الگوریتم PSO، اعضای جمعیت جواب‌ها، به صورت مستقیم با هم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات با یکدیگر و یادآوری خاطرات خوب گذشته، به حل مسئله می‌پردازند. الگوریتم PSO برای انواع مسائل پیوسته و گسسته مناسب است و پاسخ‌های بسیار مناسبی برای مسائل بهینه‌یابی مختلف داده است [۱۱].

با بررسی دقیق منابع می‌توان دریافت که اغلب مطالعات انتشار یافته در مورد هموژنیزاسیون با امواج فراصوت اغلب در مورد شیر و خامه گاو و تأثیر آن بر روی اندازه ذرات و پایداری آن‌ها بوده و متأسفانه خصوصیات رئولوژیکی آن‌ها چندان مورد ارزیابی قرار نگرفته است و با توجه به ماهیت

1. Particle Swarm Optimization (PSO)  
2. Swarm Intelligence



در لیوان پلی‌اتیلن بسته‌بندی و در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  تا زمان انجام آزمون‌ها در یخچال نگهداری شدند.

### جدول (۱) سطوح متغیرهای مستقل طرح باکس-بنکن فرآیند فراصوت نمونه‌های خامه شتر

**Table 1.** Independent variables levels of Box-Behnken design for ultrasound treatment of camel milk cream

Sample codes	Power (W)	Time (min)	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
کد نمونه	توان	زمان	دما
1	360	1	45
2	240	6	25
3	240	1	62
4	360	6	45
5	360	3.5	25
6	240	3.5	45
7	240	3.5	45
8	120	3.5	25
9	120	3.5	62
10	120	6	45
11	240	6	62
12	240	3.5	45
13	120	1	45
14	360	3.5	25
15	240	3.5	45
16	240	1	25
17	240	3.5	45

با قطر ۵۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm و پروب با قطر ۴۵ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm و سرعت حرکت پروب ۱ mm/s در نظر گرفته شد. نمونه‌های خامه در دمای  $10^{\circ}\text{C}$ ، تا ۶۰٪ ارتفاع اولیه (ارتفاع ۴۰ mm از سیلندر) توسط پروب دستگاه اکستروژن شدند. بیشترین مقدار نیرو در قسمت مثبت نمودار به عنوان سختی<sup>۲</sup>، مساحت زیر نمودار در قسمت مثبت به عنوان قوام<sup>۳</sup> و مساحت زیر نمودار در قسمت منفی به عنوان چسبندگی<sup>۴</sup> از منحنی‌های نیرو - زمان استخراج شدند.

### ۵.۲. آنالیز رنگ

رنگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هانتربل مدل (D25LT, Hunter Associates Laboratory, Reston, Virginia) برای هر نمونه در سه تکرار اندازه‌گیری و شاخص‌های  $L^*$  (سیاه

### ۳.۲. تصویربرداری میکروسکوپی

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های خامه شیر شتر و تهیه عکس‌های میکروسکوپی از میکروسکوپ نوری مدل DB2-180M مجهز به دوربین دیجیتالی ساخت شرکت صا ایران کشور ایران استفاده شد. این دستگاه امکان بزرگنمایی ذره تا ۲۰۰۰ برابر را دارد. پس از ریختن ۱۰  $\mu\text{l}$  از نمونه روی لام و قرار دادن لام روی نمونه از بزرگنمایی ۱۰۰۰ (۱۰۰۰\* عدسی شیئی) برای بررسی اندازه ذرات نمونه‌ها استفاده شد.

### ۴.۲. آزمون اکستروژن پسرو<sup>۱</sup>

برای آنالیز بافت با استفاده از آزمون اکستروژن پسرو از دستگاه تکسچرآنالایزر (Brookfield Texture Analyzer, USA) استفاده شد [۱۲]. جهت انجام این آزمون از سیلندر

2. Hardness  
3. Consistency  
4. Adhesiveness

1. Back extrusion test

که در آن  $Y$  عبارت است از متغیر تابع یا پاسخ،  $x_i$  سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل (توان (W)، زمان (min)، دما ( $^{\circ}C$ ) و  $x_i^2$  اثرات درجه دوم و  $x_i x_j$  ضرایب اثرات متقابل می‌باشند. با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) معنی‌دار بودن اثرات خطی، درجه دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون برای هر پاسخ در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۱ بررسی گردید.

## ۷.۲. بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و

### تپه‌نوردی

در الگوریتم ازدحام ذرات، تعدادی از موجودات که به آن‌ها ذره گفته می‌شود در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه‌کردن مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آنکه جواب مورد نظر به دست آید.

صفر تا سفید ۱۰۰)،  $a^*$  (قرمز ۶۰ تا سبز ۶۰-) و  $b^*$  (زرد ۶۰ تا آبی ۶۰-) به دست آمدند. شاخص سفیدی<sup>۱</sup> (WI) نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه شد [۱۳]:

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

## ۶.۲. مدل‌سازی و آنالیز آماری

در این پژوهش، تیمارهای فرایند به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح باکس-بنکن (BBD) (۵ تکرار در نقطه مرکزی) برای سه متغیر مستقل و در سه سطح انجام شد به صورتی که تعداد کل تیمار (مطابق جدول ۲) به دست آمد. نتایج پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری (Design-Expert version 10) به روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> مدل‌سازی شد و هر یک از متغیرهای پاسخ (متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، سختی، قوام، چسبندگی و شاخص سفیدی) در قالب مدل رگرسیون چندجمله‌ای زیر به صورت تابعی از متغیرهای مستقل ارائه شدند:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{i,j} x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{i,j} x_i x_j \quad (1)$$

جدول (۲) متغیرهای مستقل در فرایند فراصوت نمونه‌های خامه شتر و سطوح آنها

Table 2. Independent variables and their levels for ultrasound treatment of camel milk

Independent variables name نام متغیرهای مستقل	Symbol نماد	Variable Range حدود متغیر		
		-1	0	+1
Power (W) توان	A	120	240	360
Time (min) زمان	B	1	3.5	6
Temperature ( $^{\circ}C$ ) دما	C	25	45	65

1. Whiteness Index

2. Response surface methodology

وابسته با استفاده از روش سطح پاسخ برای متغیرهای معنی‌دار در جدول (۳) آورده شد. برای بررسی صحت مدل از ضریب تبیین ( $R^2$ ) و آزمون عدم برازش<sup>۱</sup> استفاده گردید. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است ضریب تبیین برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده بالاتر از ۰/۸ بوده و فاکتور عدم بر ارزش نیز برای کلیه صفات اندازه‌گیری شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین بالا بودن ضریب تبیین و معنی‌دار نبودن عدم بر ارزش برای تمامی پاسخ‌ها صحت مدل را برای برازش اطلاعات تأیید می‌کند. برای مشاهده بهتر اثر متغیرهای مستقل بر روی صفات مورد آزمایش، نمودارهای سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته رسم گردید.

### ۲.۳. متوسط اندازه ذرات گویچه چربی

متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌های مورد آزمون بین ۱/۵ تا ۲/۴  $\mu\text{m}$  متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه دو ( $Y_1$ ) نشان داد توان، زمان و دما در سطح ۹۵٪ بر روی متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌ها معنی‌دار بودند. شکل (۱) تأثیر توان، زمان و دمای فراصوت را بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی را با توجه به ضرایب مدل  $Y_1$  (جدول ۳) نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش توان، متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این تأثیر همان‌گونه که در مقدمه نیز گفته شد، پدیده حفره‌زایی و گرمای موضعی شدید و فشار بالای حاصل از متلاشی شدن حباب‌ها است که این تنش‌ها و از هم پاشیدن مکرر حباب‌ها موجب حرکت سریع جریان مایع به سمت ذرات نمونه‌ها شده و مقاومت آن‌ها در برابر جریان مایع، منجر به آسیب به دیوار ذرات می‌شود. در نتیجه، این آسیب‌های شدید، تنش‌های مکانی و زودگذری را بر سطح ذرات خامه تولید و به قطعه قطعه شدن ذرات می‌انجامد [۱۵]. افزایش زمان نیز از ۱ تا ۳ min تأثیر چندانی بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌ها ندارد ولی با افزایش زمان ۳ تا ۶ min متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله  $t+1$  ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از:

$$V_{t+1} = WV_t + C_1r_1(x_{i,best_t} - x_t) + C_2r_2(x_{g,best_t} - x_t) \quad (1)$$

$$x_{t+1} = x_t + V_{t+1} \quad (2)$$

در این روابط  $W$  ضریب لختی،  $I_1$  و  $I_2$  اعداد تصادفی در بازه [۰،۱] و همچنین  $C_1$  و  $C_2$  ضرایب یادگیری هستند.  $I_1$  و  $I_2$  باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل  $C_2$  ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد [۱۱].

تپه نوردی نیز یک تکنیک بهینه‌سازی متعلق به خانواده الگوریتم‌های جستجوی محلی است. یک تکنیک تکرار شونده که با یک راه‌حل دلخواه شروع به کار کرده و سپس تلاش می‌کند تا با تغییر بر روی یک عنصر از راه حل، به پاسخ بهتری دست پیدا کند. اگر این تغییر منجر به ایجاد یک راه حل بهتر شود، تغییر دیگری بر روی این راه حل جدید انجام خواهد گرفت. این روال تا زمانی که بهبود بیشتری در راه حل میسر نباشد ادامه می‌یابد. نرم‌افزار Design Expert نیز با استفاده از این الگوریتم نقاط بهینه مدل تجربی تعیین شده را محاسبه می‌کند [۱۴].

روابط بهینه‌یابی فرآیند با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات توسط نرم‌افزار متلب (۲۰۱۶) انجام شد و سپس با استفاده از آزمون  $t$  (نرم‌افزار اکسل) میانگین نقاط بهینه مطلوب به دست آمده با یکدیگر مقایسه شدند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. تعیین مدل‌های مناسب

مدل‌های تجربی به دست آمده برای پیش‌بینی متغیرهای

1. Lack of fit

جدول (۳) مدل‌های تجربی به دست آمده با استفاده از روش باکس-بنکن برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته فرآیند فراصوت خامه شیر شتر

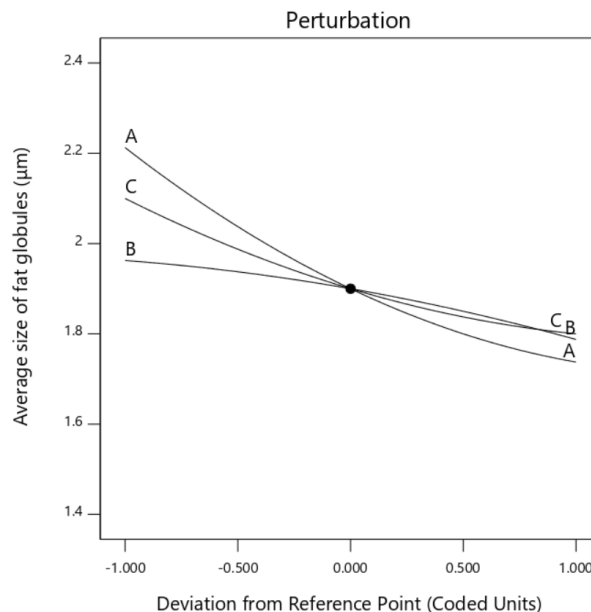
Table 3. Experimental models of Box-Behnken design for Predicting dependent variables of ultrasound treatment of camel milk cream

Dependent variable	Equation معادله	F Value	p-value Probe > F	R2	CV	Lack of fit
متغیرهای وابسته Average size of fat globules متوسط اندازه ذرات گویچه چربی	$y_1 = 2.9178 - 0.0043A + 0.1455B - 0.0125C - 0.0001AB + 1.0416e - 5AC - 0.0025BC + 5.2083e - 6A^2 - 0.004B^2 + 0.000125C^2$	1.69	0.0006	0.95	3.76	n.s.
سختی Hardness	$y_2 = -15.4126 + 0.2096A + 0.6116B + 1.7143C - 0.0219AB + 0.0005AC + 0.0616BC - 0.0003A^2 + 0.3400B^2 - 0.0217C^2$	7.16	0.006	0.94	6.40	n.s.
چسبندگی Adhesiveness	$y_3 = -0.6298 + 0.0039A + 0.0498B + 0.01406C - 0.0003AB + 1.0416e - 05AC + 0.0008BC - 6.6550e - 06A^2 - 0.002B^2 - 0.0001C^2$	28.70	0.0028	0.98	9.85	n.s.
قوام Consistency	$y_4 = 5.427 + 0.0022A + 0.2516B + 0.1422C - 0.0012AB - 2.0833e - 05AC - 0.00433BC - 1.1574e - 06A^2 - 0.04B^2 - 0.0013C^2$	10.85	0.0175	0.96	1.63	n.s.
شاخص سفیدی Whiteness index	$y_{75} = 94.77475 + 0.0012A + 0.0431B + 0.0026C$	10.25	0.0022	0.75	0.10	n.s.

Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual

Average size of fat globules (µm)

Actual Factors  
A: Power = 240  
B: Time = 3.5  
C: Temperature = 45



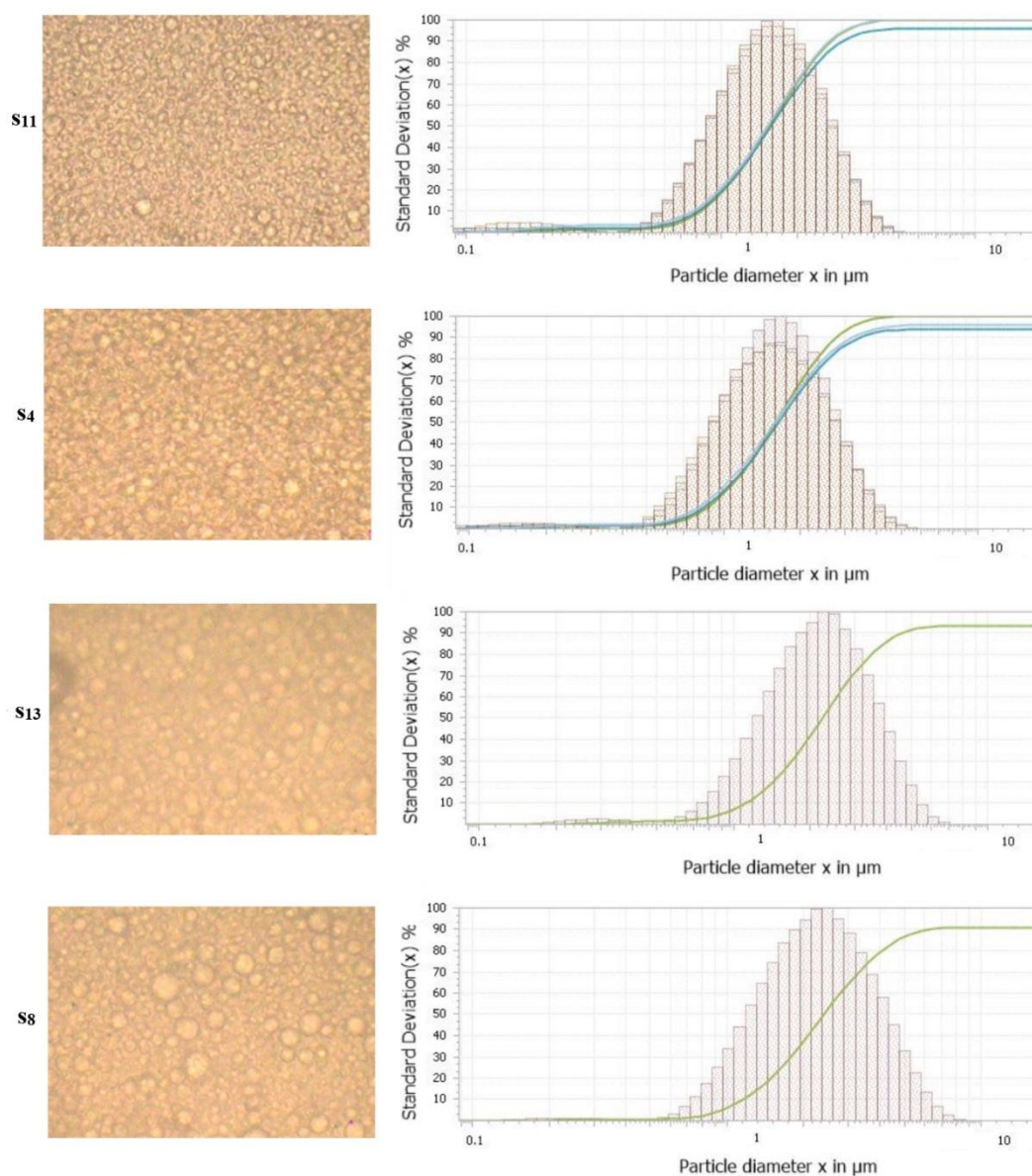
شکل (۱) تأثیر توان، زمان و دمای فراصوت بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی خامه شیر شتر

Fig1. Effect of the ultrasound power, time and temperature on the average size of fat globules of camel milk cream

که این امر احتمالاً بخشی به خاطر کاهش ویسکوزیته خامه در دماهای بالاتر و بخشی مربوط به اثر دما روی نرم‌تر شدن گویچه‌ها و در نهایت شکسته شدن آسان‌تر آنها می‌باشد [۱۶]. شکل (۳) نیز تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های خامه (تیمارهای ۱۱ و ۴ جدول ۱) که دارای کوچکترین

دلیل این امر، شاید مشابه اثر توان باشد. با این توضیح که با افزایش زمان به علت افزایش طول مدت اثرات گفته شده، کاهش بیشتری در متوسط اندازه ذرات گویچه چربی دیده شد. همچنین نتایج نشان داد که (شکل ۱) افزایش دما نیز منجر به کاهش متوسط اندازه ذرات گویچه چربی می‌شود

اندازه ذرات و (تیمارهای ۱۳ و ۸ جدول ۱) که دارای بزرگترین اندازه ذرات می‌باشند را نشان می‌دهد.



شکل (۲) تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های خامه شیر شتر S<sub>11</sub>: توان ۲۴۰ W، زمان ۶ min، دما ۶۵ °C، S<sub>4</sub>: توان ۳۶۰ W، زمان ۶ min، دما

۴۵ °C (S<sub>13</sub>: توان ۱۲۰ W، زمان ۱ min، دما ۴۵ °C، S<sub>8</sub>: توان ۱۲۰ W، زمان ۳/۵ min، دما ۲۵ °C)

**Fig 2.** Micrographs of camel milk cream samples as affected by the ultrasound treatment (power, time and temperature of sonication): (S<sub>11</sub>) 240 W, 6 min and 65 °C; (S<sub>4</sub>) 360 W, 6 min and 45 °C; (S<sub>13</sub>) 120 W, 1 min and 45 °C; (S<sub>8</sub>) 120 W, 3.5 min and 25 °C.

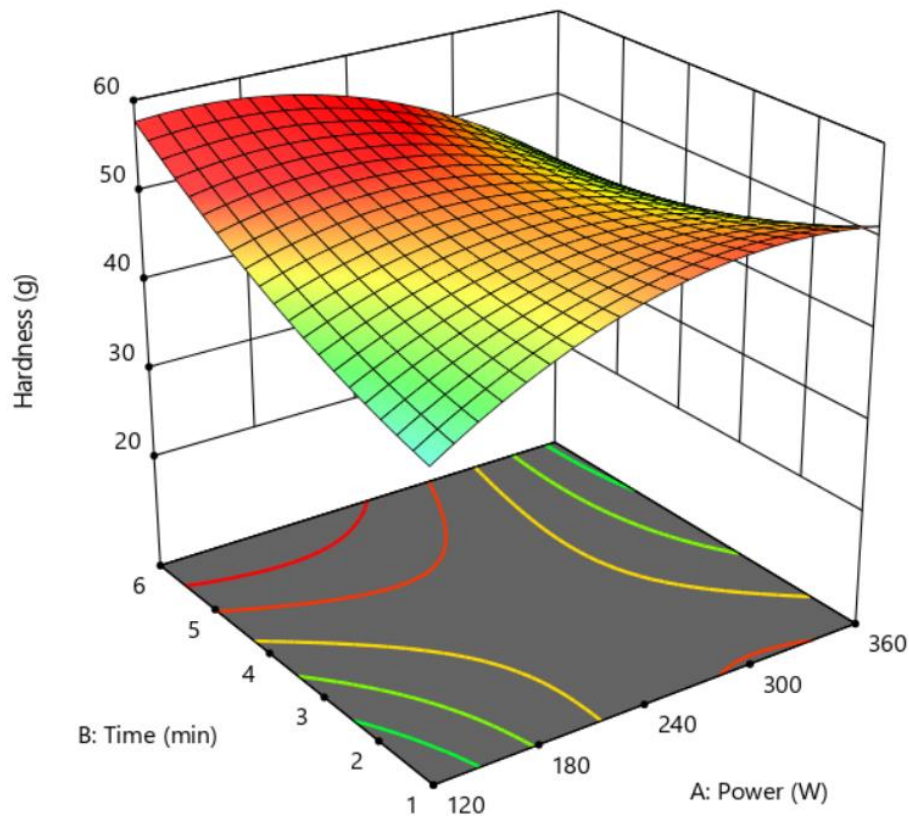


چربی شد [۱۶]. ارتوگای و سنگال کوچکترین ذرات چربی شیر را در فرایند هموژنیزاسیون با فراصوت شیر گاو در توان ۴۵۰ W و زمان ۱۰ min مشاهده کردند [۹].

### ۳.۳. سختی

سختی نمونه‌های مورد آزمون بین ۳۵ تا ۵۳ متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه دو  $Y_3$  (جدول ۳) نشان می‌دهد فقط اثر متقابل توان-زمان در سطح ۹۵٪ بر روی سختی نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل (۴) تأثیر توان و زمان را بر روی سختی نمونه‌ها (دمای ۴۵ °C) را با توجه به ضرایب مدل  $Y_3$  نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش توان و زمان تیمار فراصوت، متوسط اندازه ذرات گویچه چربی نمونه‌های خامه کوچک‌تر می‌شود به طوری که نمونه‌های S11 (توان ۲۴۰ W، زمان ۶ min، دما ۶۵ °C) و S4 (توان ۳۶۰ W، زمان ۶ min، دما ۴۵ °C) دارای کوچکترین متوسط اندازه ذرات گویچه چربی (۱/۵ و ۱/۶  $\mu\text{m}$ ) و نمونه‌های S13 (توان ۱۲۰ W، زمان ۱ min، دما ۴۵ °C) و S8 (توان ۱۲۰ W، زمان ۳/۵ min، دما ۲۵ °C) دارای بزرگترین متوسط اندازه ذرات گویچه چربی (۲/۲ و ۲/۴  $\mu\text{m}$ ) می‌باشند. بوسیلکا و همکاران نیز نشان دادند که در هموژنیزاسیون شیر سویا با فراصوت، بالاترین توان (۱۰۰ W) و بیشترین زمان (۱۵min) منجر به ایجاد کوچکترین ذرات



شکل (۳) تأثیر توان و زمان فراصوت بر سختی خامه شیر شتر (دما ۴۵ °C)

Fig 3. Effect of the ultrasound power and time on the hardness of camel milk cream (temperature of 45 °C)

مشاهده کردند که افزایش توان و زمان اعمال امواج فراصوت بر شیر، به دلیل ایجاد اختلال در ساختار سوم و چهارم میسل کازئین، افزایش کازئین در دسترس و ایجاد شبکه قوی‌تر منجر به افزایش گرانبوی در ماست گردید [۲۰]. رینر و همکاران نیز افزایش ویسکوزیته و قوام ماست تولیدی با شیر تیمار شده با امواج فراصوت را گزارش کردند [۲۱].

### ۵.۳. چسبندگی

چسبندگی نمونه‌های مورد آزمون به ترتیب بین ۰/۱ تا ۰/۳ میلی ژول متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه دو  $Y_5$  (جدول ۳) نشان می‌دهد فقط اثرات توان و زمان در سطح ۹۵٪ بر چسبندگی نمونه‌ها معنی‌دار بود. شکل (۵) تأثیر توان و زمان را بر چسبندگی نمونه‌ها (دما  $45^{\circ}\text{C}$ ) را با توجه به ضرایب مدل  $Y_5$  نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در توان‌های پایین، با افزایش زمان چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد ولی در توان‌های بالا با افزایش زمان چسبندگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در ارتباط با چسبندگی نمونه‌های خامه می‌توان گفت که نیروی چسبندگی، نیروی لازم جهت غلبه بر نیروی جاذبه سطحی بین ذرات است [۲۲] لذا چسبندگی نیز مانند شاخص سختی تحت تأثیر شبکه سه بعدی ضعیف ایجاد شده توسط توان و زمان بالا می‌گیرد. به عبارتی با افزایش اتصالات عرضی پروتئین‌ها و تقویت شبکه سه بعدی پروتئینی و افزایش سختی در اثر هموزنی‌زاسیون، چسبندگی نیز افزایش پیدا کرد، یعنی نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک ذرات با سطوح تماس افزایش یافته است.

### ۶.۳. شاخص سفیدی

رنگ شیر معمولاً سفید کدر یا به اصطلاح سفید چینی است که ناشی از انعکاس نور توسط گلبول‌های چربی و ذرات کلوئیدی کازئینات کلسیم و فسفات کلسیم می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که شاخص سفیدی نمونه‌های مورد آزمون بین  $95/02$  تا  $95/53$  متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه سه  $Y_8$  (جدول ۳) نشان می‌دهد که در بین اثرات خطی، متقابل و درجه دوم، تنها اثرات خطی توان و زمان در سطح ۹۵٪ بر شاخص سفیدی نمونه‌ها معنی‌دار بود. همچنین

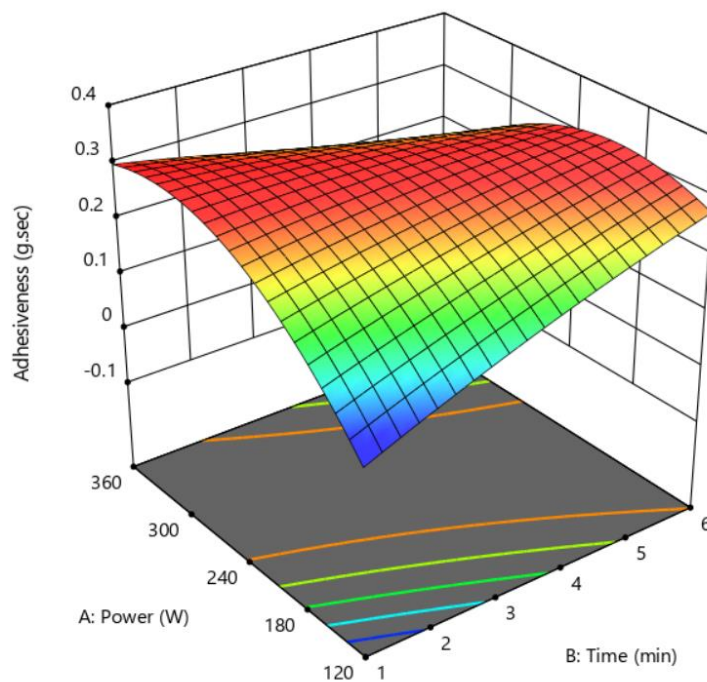
با توجه به شکل (۳) در توان‌های پایین، با افزایش زمان سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد ولی در توان‌های بالا با افزایش زمان سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد به گونه‌ای که سختی نمونه با توان  $30\text{ W}$  و زمان  $6\text{ min}$  با سختی نمونه با توان  $360\text{ W}$  و زمان  $1\text{ min}$  تقریباً برابر است. توان بالا باعث ایجاد گلبول‌های چربی کوچکتر و در نتیجه افزایش لایه سطحی آن‌ها می‌شود. پروتئین‌های موجود در سرم خامه به سطح این گلبول‌ها منتقل می‌شوند [۴] و این پدیده خود باعث افزایش سختی نمونه‌ها می‌شود. ولی افزایش بیشتر زمان در توان‌های بالا منجر به تخریب بیشتر ساختار گلبول‌های چربی می‌گردد که پایین بودن غلظت پروتئین‌های سرمی نیز منجر به کاهش مقاومت درونی نمونه‌های خامه [۱۸] و نهایتاً کاهش سختی می‌شوند. از طرفی افزایش زمان در توان‌های بالا با تأثیر بر پیوندهای الکترواستاتیکی و سایر پیوندهای موجود در میسل کازئین مثل پیوندهای ایجاد شده با مولکول‌های آب، باعث سست و شکسته شدن این پیوندها شده است به طوری که هرچه میزان انرژی اعمال شده بیشتر باشد، میزان شکسته شدن پیوندها بیشتر و در نتیجه، میزان سختی کمتر می‌شود.

### ۴.۳. قوام

قوام نمونه‌های مورد آزمون بین  $7/9$  تا  $9/1\text{ g/s}$  متغیر بود. مدل چند جمله‌ای درجه دو  $Y_4$  (جدول ۳) نشان می‌دهد فقط اثر توان و اثر متقابل توان-زمان در سطح ۹۵٪ بر قوام نمونه‌ها معنی‌دار بودند. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش میزان زمان در توان پایین قوام نمونه‌ها افزایش می‌یابد ولی در توان‌های بالا با افزایش زمان قوام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به احتمال زیاد افزایش توان باعث کاهش توزیع اندازه ذرات موجود در امولسیون شده که با کاهش توزیع اندازه ذرات ویسکوزیته خامه و در نتیجه قوام افزایش می‌یابد. اصولاً در مایعات بسیار غلیظ اندازه ذرات و اثر متقابل ذرات نقش مهمی در ویسکوزیته و قوام دارند. به طوری که معمولاً با کاهش اندازه ذرات قوام کاهش ولی با رسیدن به اندازه مشخصی، به دلیل افزایش ذرات کوچک و یا افزایش برهم کنش بین این ذرات، ویسکوزیته و قوام شروع به افزایش می‌کند [۱۹]. ویو و همکاران نیز در بررسی خود

جمله عوامل مؤثر در رنگ شیر می‌باشند. برمودز اگیر و همکاران تغییرات کلی رنگ بیشتر در نمونه‌های تیمار شده با امواج فراصوت نسبت به نمونه‌های شیرخام و شیر حرارت دیده شده را ناشی از همگن‌سازی بهتر گویچه‌های چربی توسط امواج فراصوت دانستند [۱۰]. کانور و همکاران نشان دادند که هموژنیزاسیون شیر منجر به افزایش سفیدی پنیر تولید شده از آن شد [۲۴].

نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش توان و زمان شاخص سفیدی نمونه‌ها افزایش یافت. پراکندگی نور در هر سیستمی به ناهماهنگی مولکولی و یا حتی سطح اتم‌ها می‌باشد. تغییر در پارامتر  $b^*$  تیمارها می‌تواند ناشی از تغییرات ساختار ناشی از اثرات تغییرات چربی باشد که منجر به تغییرات متفاوت پراکنش نور می‌گردد [۲۳]. در رابطه با شیر عنوان شده که اندازه گویچه‌های چربی، توزیع اندازه پروتئین‌های شیر، بروز واکنش مایلارد، دناتوراسیون و انعقاد پروتئین‌های سرمی از



شکل (۴) تأثیر توان و زمان فراصوت بر چسبندگی خامه شیر شتر (دما ۴۵ °C)

Fig 4. Effect of the ultrasound power and time on the adhesiveness of camel milk cream (temperature of 45 °C)

### ۷.۳. بهینه‌یابی

بنکن (جدول ۳) هستند. در الگوریتم‌های بهینه‌یابی پارامترهایی وجود دارند که تغییرات آن‌ها باعث تغییر عملکرد الگوریتم می‌گردد و در سرعت همگرایی و مرغوبیت جواب‌ها تأثیرگذار خواهد بود. به دست آوردن بهترین پارامترها با سعی و خطا و یا استناد به مرور منابع می‌باشد. لذا به منظور بهتر شدن کارایی الگوریتم ازدحام ذرات سعی و خطاهایی برای به دست آوردن بهترین مقدار برای هر پارامتر انجام شد که نتایج نهایی آن‌ها در جدول (۴) بیان شده است.

در این پژوهش به منظور بهینه‌یابی شرایط هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر با استفاده از تغییرات توان، زمان و دما تلاش بر این بود که برای بهبود خصوصیات خامه شیر شتر تا حد امکان سختی و قوام به عنوان توابع هدف افزایش و متوسط اندازه ذرات گویچه چربی و چسبندگی کاهش یابند. داده‌های اولیه داده شده به الگوریتم ازدحام ذرات در حقیقت داده‌های مدل‌های پیش‌بینی شده از طرح باکس

**جدول (۴)** پارامترهای بهینه یابی فرآیند هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات  
**Table 4.** Optimization parameters of ultrasonic homogenization process of camel milk cream using particle swarm algorithm

Factor name نام عامل	Ultrasonic homogenization parameters of camel milk cream پارامترهای بهینه یابی فرآیند هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر
The objective function تابع هدف	Selected model of the Box-Benken Design مدل منتخب طرح باکس بنکن
The number of variables تعداد متغیرها	3 variables ۳ متغیر 1. Power (x1) توان 2. Time (x2) زمان 3. Temperature (x3) دما
The range of independent variables حدود متغیرهای مستقل	X1=120-360 X2=1-6 X3=25-65
Maximum number of iterations تعداد تکرار	Given the convergence of about 50 با توجه به همگرایی حدود ۵۰
Number of particles تعداد ذرات	Depending on the model type, about 50 با توجه به نوع مدل حدود ۵۰
Inertia coefficient (w1) ضریب اینرسی	About 0.5 (increasing this parameter leads to higher global search but less accuracy) حدود ۰/۵ (افزایش این پارامتر منجر به افزایش جستجوی سراسری بالاتر اما دقت کمتر می گردد)
Personal learning factor (c1) ضریب یادگیری شخصی	1
Overall learning factor (c1) ضریب یادگیری کلی	2
Type of multiple objective optimization algorithm نوع الگوریتم بهینه یابی چند هدفه	Pareto پارتو
End condition شرط خاتمه	Passing a certain number of iterations without any improvement in the result سپری شدن تعداد معینی از تکرارها بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه

آیا این تغییر باعث بهبود مقدار  $f(x)$  شده است یا خیر. در الگوریتم تپه‌نوردی هر تغییری که باعث بهبود  $f(x)$  شود قابل قبول است و این پروسه تا زمانی که هیچ تغییری منجر به بهبود مقدار  $f(x)$  نگردد، ادامه می‌یابد. در این مرحله،  $x$  به عنوان بهینه محلی و خروجی الگوریتم خواهد بود. ۵ نقطه بهینه توان، زمان و دمای مطلوب به دست آمده با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم تپه‌نوردی در جدول (۵) نشان داده شده است.

همچنین با استفاده از قابلیت بهینه‌یابی عددی در نرم‌افزار Design Expert که با استفاده از الگوریتم تپه‌نوردی محاسبه می‌شود، شرایط دقیق فرآیند (توان، زمان و دما) بر متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، سختی، قوام و چسبندگی نمونه‌ها نیز محاسبه شد. الگوریتم تپه‌نوردی تلاش می‌کند تا تابع هدف  $f(x)$  را بیشینه (یا کمینه) کند، که  $x$  برداری از مقادیر پیوسته و یا گسسته است. در هر تکرار، الگوریتم تپه‌نوردی یک عنصر از  $x$  را تنظیم کرده و بررسی می‌کند که



**جدول (۵)** نقطه بهینه مطلوب به دست آمده با استفاده از الگوریتم الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم تپه‌نوردی برای دستیابی به حداکثر سختی و قوام و حداقل متوسط اندازه ذرات گویچه چربی و چسبندگی  
**Table 5.** Optimal point obtained by using particle swarm and hill climbing algorithms to achieve maximum hardness and consistency and Minimum mean average size of fat globules and adhesiveness

	Hill climbing algorithm						Particle swarm algorithm						Comparison of means (t-test) آزمون مقایسه میانگین‌ها	
	No	1	2	3	4	5	Average	1	2	3	4	5		Average
							میانگین							
Power توان	310.848	310.83	309.323	310.574	307.832	309.8814	324.07	360	336.37	341.62	305.95	333.602	significant	
Time زمان	6	6	6	6	6	6	6	1.4745	1.3797	1.2302	3.9296	2.8028	significant	
Temperature دما	41.774	41.606	41.412	42.234	41.285	41.6622	65	25	65	29.93	35.62	44.11	Non-significant	
Average size متوسط اندازه ذرات	1.687	1.69	1.695	1.681	1.699	1.6904	0.79949	1.196	1.2975	1.2255	1.3554	1.174778	significant	
Hardness سختی	46.742	46.672	46.764	46.966	46.881	46.805	48.636	47.245	48.099	52.493	49.559	49.2064	significant	
Adhesiveness چسبندگی	8.851	8.852	8.862	8.852	8.873	8.858	8.8181	8.6229	8.6265	8.9764	9.0734	8.82346	Non-significant	
Consistency قوام	0.193	0.192	0.194	0.196	0.195	0.194	0.76974	0.97384	0.8975	0.96672	0.74227	0.870014	significant	



گرفت و این شرایط به گونه‌ای بهینه شد که سختی و قوام حداکثر و متوسط اندازه ذرات گویچه چربی و چسبندگی حداقل باشند. یافته‌های بررسی حاضر نشان داد که اگر چه تغییرات توان و زمان به تنهایی تقریباً اثرات مشابهی بر خصوصیات مورد ارزیابی داشتند اما در برخی خصوصیات از جمله سختی و چسبندگی افزایش هم زمان منجر به تأثیر متفاوت بران پاسخ‌ها داشت. از طرفی نتایج تحقیق نشان داد برای یافتن حل‌های بهینه در مسائل غیر خطی، الگوریتم فرا ابتکاری هوشمندی همچون ازدحام ذرات بسیار مؤثرتر و کارا تر نسبت به الگوریتم‌های کلاسیک از جمله الگوریتم تپه نوردی می‌باشد که با توجه به قدرت و کارایی آن می‌تواند در کاربردهای مختلف توسعه یابد. به طور کلی بر اساس نتایج این تحقیق می‌توان فرایند فراصوت را به دلیل توانایی در کاهش متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، افزایش پایداری امولسیون، سختی و قوام به عنوان یک روش جدید، سریع و بالقوه در فرایند هموژنیزاسیون خامه شیر شتر معرفی کرد.

#### تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه فردوسی مشهد (گرت شماره ۵۰۸۶۲) در اجرای طرح پژوهشی «بهینه‌یابی شرایط هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه» و استخراج این مقاله تقدیر و تشکر می‌شود.

به منظور مقایسه عملکرد بهینه یابی دو الگوریتم میانگین، ۵ نقطه بهینه به دست آمده مطلوب از دو الگوریتم توسط آزمون t مقایسه شد. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که الگوریتم ازدحام ذرات میانگین توان و دمای معنی‌دار بالاتر و زمان معنی‌دار پایین‌تری را به دست آورد که این نقاط به دست آمده منجر به کاهش معنی‌دار متوسط اندازه ذرات گویچه چربی و افزایش سختی شدند که از اهداف اصلی شرایط بهینه‌یابی بودند (جدول ۵). بنابراین به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ازدحام ذرات از عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم تپه نوردی در بهینه‌یابی مدل‌های به دست آمده از طرح باکس بنکن در بهینه‌یابی شرایط هموژنیزاسیون فراصوت خامه شیر شتر بود. لو و همکاران نیز عملکرد بالای الگوریتم ازدحام ذرات را برای مدل‌های درجه دوم به دست آمده از روش سطح پاسخ در بهینه‌یابی آنزیمی استخراج پروتئین سبوس جو دوسر نشان دادند [۲۵].

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت تولید فرآورده‌های چرب شیر شتر از جمله خامه آن و نقش فراصوت به عنوان یک ابزار مؤثر در هموژنیزاسیون در این تحقیق اثر شرایط مختلف فراصوت از جمله توان، زمان و دما روی متوسط اندازه ذرات گویچه چربی، خصوصیات رئولوژیکی (سختی، قوام و چسبندگی) و رنگ (شاخص سفیدی) خامه شیر شتر مورد بررسی قرار

#### منابع

- [1] Hagrass, A.E., Hssan, A.A., Soryal, K.A., Mervat, A.S., & El-Shabrawy, S.A. (1987). Chemical composition of fat and butter of camel's milk. *Egypt. J Food Sci.*, 15, 15-25.
- [2] Al haj, A., & Al Kanhal, H. A. (2010). Compositional, technological and nutritional aspects of dromedary camel milk, *Int Dairy J.*, 20 (12), 811-821.
- [3] Kohler, K., Aguilar, F.A., Hensel, A., Schubert, K., Schubert, H., & Schuchmann, H.P. (2007). Design of a microstructured system for homogenization of dairy products with high fat content. *Chem Eng Technol*, 30, 1590-1595.
- [4] Darling, D.F., & Butcher, D.V. (1978). Milk-fat globule membrane in homogenized cream. *J. Dairy Res.* 45, 197-208.
- [5] Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., & Lee, D. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends Food Sci. Technol.*, 15, 261-266.
- [6] Patist, A., & Bates, D. (2008) Ultrasonic innovations in the food industry: from the laboratory

- to commercial production. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 9,147-154.
- [7] Bermudez-Aguirre, D., Mawson, R., Versteeg, C., & Barbosa-Canovas, G. (2009). Composition properties, physicochemical characteristics and shelf life of whole milk after thermal and thermo-sonication treatments. *J. Food Qual.*, 32, 283-302.
- [8] Ahmed, J., Ramaswamy, H., Kasapis, S., & Boye, J. (2010). *Novel Food Processing Effects on Rheological and Functional Properties*. United Kingdom :Taylor and Francis Group, pp. 65-98.
- [9] Ertugay ,M.F., & Sengul, M. (2004). Effect of ultrasound treatment on milk homogenisation and particle size distribution of fat. *Turk J Vet Anim Sci.*, 28, 303-308.
- [10] Bermudez-Aguirre, D., Mawson, R., & Barbosa, G.V. (2008) Microstructure of fat globules in whole milk after thermosonication treatment. *J. Food Sci. Technol.*, 73, 325-32.
- [11] Yang, X.S. (2010). *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, Inc.
- [12] Bourne, M.C. (1978). Texture profile analysis. *Food Technol.*, 32, 62-66 72.
- [13] Shie, J.S., & Park, J.W. (1999). Physical characteristics of surimi seafood as affected by hermal processing conditions. *J Food Sci.*, 64(2), 287-290.
- [14] STAT-EASE. (2000). *Design expert user's guide*. Minneapolis: Stat-Ease Inc.
- [15] Sun, D.W. (2005) *Emerging Technologies for Food Processing*. Cambridge, Massachusetts: Elsevier Academic Press, pp. 323-344.
- [16] Krukovsky, V.N., & Sharp, P. F.(1940). Effect of the Properties of the Fat and of the Fat Globule Surface on Lipolytic Activity in Milk, *J. Dairy Sci.*, 23(11), 1109-1118.
- [17] Bosiljkov, T., Brncic, M., Tripalo, B., Karlovic, S., Ukrainczyk, M., Ježek, D., & Rimac, S. (2009). Impact of ultrasound-enhanced homogenization on physical properties of soybean milk. *Chem. Eng. Trans.*, 17, 1029-1034.
- [18] Mulder, H., & Walstra, P. (1974). *The Milk Fat Globule. Emulsion is applied to milk products and comparable foods*. Wageningen, Netherlands: Center for Agricultural Publishing and Documentation.
- [19] Soria, A.C., & Villamiel, M. (2010) Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends Food Sci Technol*, 21, 323-331.
- [20] Wu, H., Hulbert, G.J., & Mount, J. (2001) Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 1, 211-218.
- [21] Riener, J., Noci, F., Cronin, D.A. Morgan, D.J., & Lyng, G.J. (2009) The effect of thermosonication of milk on selected physicochemical and microstructural properties of yoghurt gels during fermentation. *Food Chem.*, 114, 905-911.
- [22] Park, Y.W. (2007). Rheological characteristics of goat and sheep milk. *Small Ruminant Res*, 68(8), 73-78.
- [23] Tuyen, T., Martin, P., Nidhi, B., & Bhesh, B. (2016). *Effect of Milk Fat Globule Size on the Physical Functionality of Dairy Products*. New York City: Springer.
- [24] Cantor, M.D., Tempel, T. van den, Hansen, T.K., & Ardo, Y. (2004). Blue cheese. In: Fox, P.F. McSweeney, P.L.H. Cogan, T. M., & Guinee, T.P (Eds.). *Cheese Chemistry, Physics and Microbiology*, Vol. 2 Major Cheese Groups, (3rd edn pp. 175–198) . Amsterdam :Elsevier Academic Press.
- [25] Liu,J., Guan, X., Zhu, D., & Sun ,J. (2008). Optimization of the enzymatic pretreatment in oat bran protein extraction by particle swarm optimization algorithms for response surface modeling. *LWT-Food Sci Technol* ,41(10), 1913-1918.

*Research Article***Optimization of ultrasonic homogenization conditions of camel milk cream using multiple objective particle swarm algorithm****Morteza Kashaninejad<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Ali Razavi<sup>2\*</sup>****1. PhD student of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)****2. Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)****Abstract**

In this research, the effects of ultrasound variables including power (120 to 360 W), time (1 to 6 min) and temperature (25 to 65 °C) on the average size of fat globules, Rheological properties (hardness, adhesiveness and consistency) and color parameters (whiteness index) of camel milk cream were investigated. Then, these properties were optimized using Box-Benken design models and Particle Swarm Optimization and hill climbing algorithm (Numerical Optimization in Design Expert software). The results of the evaluation of the measured properties showed that with increasing power, time and temperature of ultrasonication, the average size of the fat globules decreased. The results of the back-extrusion test showed that only the power-time interaction at 95% confidence level had significant effect on the hardness and adhesiveness of the samples. So that the hardness and adhesiveness of the samples increased with increasing the time in low powers. The results also showed that with increasing the power and time of ultrasonication, whiteness index of samples increased. To compare the optimization performance of two particle swarm and hill climbing algorithms, the average of 5 optimal points obtained from the two algorithms were compared by t-test. The results of t-test. showed that the particle swarm algorithm significantly achieved higher power and temperature and lower time, lead to significant decrease in average size of fat globules and increase in hardness. Therefore, it can be concluded that the particle swarm algorithm performs was better than the hill climbing algorithm in optimizing the models obtained from Box-Benken design in optimizing the homogenization conditions of camel milk cream.

**Keywords: Camel milk cream; Hill climbing algorithm; Multiple objective particle swarm algorithm; Particle size; Texture; Ultrasound**

---

\* Corresponding author: s.razavi@um.ac.ir